

Primljen / Received: 9.5.2016.

Ispravljen / Corrected: 9.10.2016.

Prihvaćen / Accepted: 14.10.2016.

Dostupno online / Available online: 10.12.2016.

Određivanje površinske temperature tla područja Splita metodom daljinske detekcije

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Tea Duplančić Leder**, dipl.ing.geod.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
tleder@gradst.hr



Doc.dr.sc. **Nenad Leder**, dipl.ing.fizike
Hrvatski hidrografski institut, Split
nenad.leder@hhi.hr



Doc.dr.sc. **Željko Hećimović**, dipl.ing.geod.
Sveučilište u Splitu
Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije
zeljko.hecimovic@gradst.hr

Pregledni rad

Tea Duplančić Leder, Nenad Leder, Željko Hećimović

Određivanje površinske temperature tla područja Splita metodom daljinske detekcije

Površinska temperatura tla (PTT) je vrlo važan parametar za velik broj procesa na Zemlji. Satelitski termalni podaci nam omogućavaju određivanje površinske temperature tla. Najvažnija i najdulja satelitska misija s termalnim kanalima, koja ima i dobru prostornu rezoluciju je Landsat misija. U ovom istraživanju korišteni su Landsat termalni kanali za određivanje PTT duž metropolitanskog područja Splita. Rezultati rada pokazuju pojave fenomena urbanih toplinskih otoka (UTO), kao istovremeni učinak intenzivne urbanizacije u metropolitanskom području grada Splita i opaženih klimatskih promjena.

Ključne riječi:

površinska temperatura tla, urbani toplinski otoci, daljinska detekcija, Landsat misija

Subject review

Tea Duplančić Leder, Nenad Leder, Željko Hećimović

Split Metropolitan area surface temperature assessment with remote sensing method

Land surface temperature (LST) is a very important parameter for a wide variety of Earth processes. The satellite thermal data enable us to obtain information on land surface temperature. The Landsat Mission is the most important and longest satellite mission with the thermal band capability and a sufficient spatial resolution. Landsat thermal channels have been used in this research to determine the LST within the metropolitan area of Split. The results point to the phenomenon of urban heat islands (UHI), as the simultaneous effect of intensive urbanization in the city of Split metropolitan area, and the observed climate changes.

Ključne riječi:

land surface temperature, urban heat islands, remote sensing, Landsat Mission

Übersichtsarbeit

Tea Duplančić Leder, Nenad Leder, Željko Hećimović

Ermittlung der oberflächigen Bodentemperatur im Gebiet von Split mittels Entfernungsdetektion

Die oberflächige Bodentemperatur (OBT) ist ein sehr wichtiger Parameter für viele Prozesse auf der Erde. Durch Satelliten gewonnene Wärmeparameter ermöglichen die Ermittlung der oberflächigen Bodentemperatur. Die wichtigste und längste Satellitenmission mit Wärmekanälen, die auch eine gute räumliche Resolution haben, ist die Landsat Mission. In diesem Forschungsvorhaben wurden Landsat Wärmekanäle verwendet, um die OBT des Stadtgebiets von Split zu ermitteln. Die Resultate weisen auf das Phänomen städtischer Wärmeinseln sowie auf eine gleichzeitige Wirkung der intensiven Urbanisation und Klimaveränderungen auf dem Stadtgebiet von Split hin.

Ključne riječi:

oberflächige Bodentemperatur, städtische Wärmeinseln, Entfernungsdetektion, Landsat Mission

1. Uvod

Rastuća urbanizacija uzrokuje promjene temperature ravnoteže u gusto izgrađenim urbanim područjima. Površinske temperature zraka i tla su važan čimbenik u studijama urbane klimatologije [1-3]. Termalna daljinska detekcija se koristi iznad urbanih područja za opažanje urbanih toplinskih otoka (UTO), određivanje i klasifikaciju zemljišnog pokrova te kao ulazni podatak za modele promjene površinske atmosfere iznad urbanih prostora [3-5].

UTO su dijelovi urbanih područja, čija je temperatura zraka i tla veća od okolnog područja (slika 1.). Oni nastaju kao posljedica činjenice da se prevladavajući urbani materijali beton, asfalt ili opeka zagrijevaju drugačije od prirodnih materijala tla, vode ili vegetacije, te mogu povećati temperaturu urbanih područja za nekoliko stupnjeva u odnosu na okolno ruralno područje [6]. Maksimumi temperature zraka se najčešće u ljetnom razdoblju pojavljuju oko 16 sati [6, 7]. Najveće se temperaturne razlike opažaju ljeti u gradovima, koji se nalaze na nizinskim predjelima ili u kotlinama te imaju više od 100.000 stanovnika [8]. Temperaturne razlike na takvim mjestima mogu iznositi 12 °C i više [6, 7]. Utjecaji urbanih toplinskih otoka su veći i lokalno imaju bolnije i značajnije posljedice od stakleničkog efekta. Uzročnici pojave UTO-a općenito mogu biti, prema [9]:

- gubitak prirodne vegetacije i njihova zamjena paronepropusnim materijalima koji uzrokuju smanjenje evapotranspiracije, smanjenje vlažnosti i suhoću gradskih područja
- dominantni urbani građevni materijali koji povećavaju pohranu termalne energije
- dijelovi urbane geometrije, npr. urbani kanjoni kao predominantne strukture, naročito u središtu grada
- ispušni plinovi automobila, industrije, rashladnih uređaja [10].

U ruralnim područjima, naprotiv, uglavnom nema pojave UTO-a zbog visoke evapotranspiracije, velikih područja hladovine koju stvara vegetacija i vodenih površina. Čimbenici koji utječu na UTO, prema [11]:

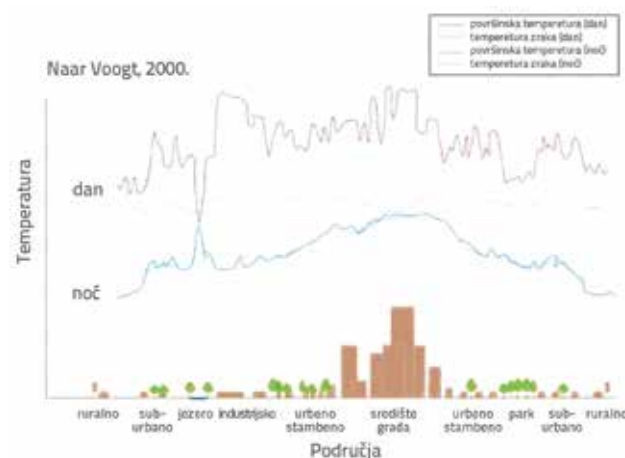
1. geografski položaj: klima, topografija, ruralni okoliš
2. vrijeme: dan, sezona
3. sinoptička situacija (granice UTO): vjetar, oblaci
4. gradski oblik: materijali, geometrija, zelene površine
5. gradske funkcije: korištenje energije, vode, zagađenje;
6. veličina grada: povezanost oblika i funkcije.

Na urbane toplinske otoke osim Sunčevog zračenja najviše utječu fizikalna svojstva dominantnih građevnih materijala [12, 13] i to:

- visoka emisija toplinske energije: beton kao dominantni urbani građevni materijal ima svojstvo velike apsorpcije toplinske energije, dok je aluminij materijal s niskom apsorpcijom

- termalna inercija: svojstvo materijala da prima i pohranjuje toplinsku energiju. Visoku termalnu inerciju imaju metal i pijesak (brzo se zagrijevaju i hlade), a nisku termalnu inerciju imaju granit i beton (sporo se zagrijevaju i hlade)
- neravnost površine: kod visokih zgrada stvaraju efekti kanjona i oni povećavaju zagrijavanje površina koje apsorbiraju toplinsku energiju i blokiraju strujanje zračnih masa koje bi hladile prostor
- albedo (omjer upadne i reflektirane Sunčeve energije s nekog predmeta): različit je za različite materijale.

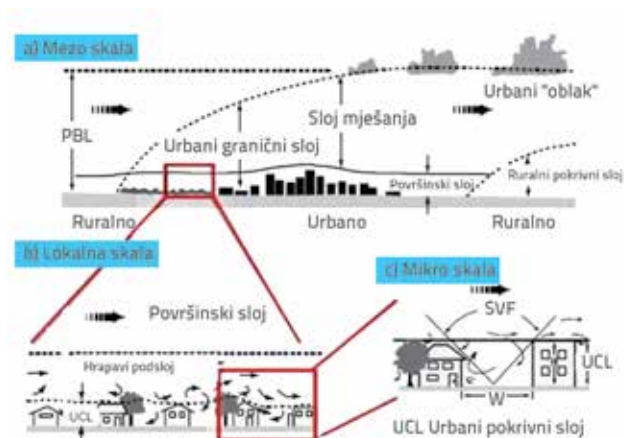
Temperaturno zagrijavanje zraka i tla te stvaranje UTO-a ovisi, također, i o korištenju zemljišta pa je temperaturno zagrijavanje različito za različite gradske zone (rezidencijalne, industrijske, turističke, prigradske zone vegetacije i parkova). Industrijske zone tako mogu biti toplije od okolnog područja za približno 7 °C [12, 14].



Slika 1. Urbani toplinski otoci [15]

Postoje dvije vrste ili dva sloja UTO-a: površinski i atmosferski sloj [3, 15] (slika 2.). Površinski toplinski otoci imaju veću površinsku temperaturu tla na urbanim područjima nego što je temperatura okolnih područja. Atmosferski toplinski otoci su predstavljeni toplijim zrakom na urbanom negoli na ruralnom području, a mogu se podijeliti u dva odvojena sloja: pokrovni sloj (eng. *canopy*), koji se proteže u zračnom sloju urbane atmosfere prema gore, od površine tla do vrhova stabala ili zgrada, te granični sloj koji se nalazi iznad pokrovnog prema gore čak do jedne milje. Površinski i atmosferski toplinski otoci imaju mnogo različitosti. Površinski toplinski otoci su prisutni danju i po noću. Najintenzivniji su ljeti s vršnim dnevnim intenzitetom od 3 do 8 °C te noćnim od 8 do 12 °C [16]. Najčešće korištena metoda za identifikaciju površinske temperature tla je indirektno mjerenje daljinskom detekcijom u termalnom ili dalje infracrvenom području [17].

Na osnovi analize nizova srednjih godišnjih temperatura zraka mjerenih na 26 meteoroloških stanica u Republici Hrvatskoj Bonacci je ustanovio nagli porast temperatura zraka na 57,7 % stanica, koji je započeo 1988. godine [18].



Slika 2. Termalni slojevi [19]

Velike svjetske metropole već desetljećima proučavaju svoje urbane prostore (primjenjuju nove materijale, proglašavaju vegetaciju) i spremaju se na klimatske promjene prilagođavajući i mijenjajući svoje prostore [12, 20]. U gradu Splitu nisu provedena slična istraživanja prilikom novijih urbanističkih zahvata i smanjivanje količine vegetacije (naročito u priobalnom pojasu u kojem se blokira strujanje rashlađenog morskog zraka – maestra [4, 6, 9]), a što može utjecati na formiranje UTO-a [11, 12].

U radu je prikazano istraživanje mikroklimatskih promjena u površinskoj temperaturi tla na metropolitanskom području grada Splita i postojanje UTO-a te njihovu možebitnu vremensku i sezonsku promjenjivost primjenom metoda daljinske detekcije. Rezultati istraživanja trebali bi upozoriti odgovorne, koji su zaduženi za planiranje, na najugroženija i najkritičnija toplinska područja kako bi na osnovi toga predložili mjere za smanjivanje površinske temperature zraka i tla.

2. Područje istraživanja

Grad Split je drugi po veličini grad u Republici Hrvatskoj. Smješten je na 43,5°N i 16,5°E. Urbano područje grada Splita s prigradskim naseljima (Donje Sitno, Gornje Sitno, Kamen, Slatine, Srinjine, Stobreč i Žrnovnica) proteže se na 80 km² (površina grada Splita je 22 km²).

Klima mu je mediteranska (Csa prema Köppenovoj klasifikaciji klime), a karakteriziraju je topla i suha ljeta sa srednjom temperaturom zraka u rasponu 21,5° do 25,9 °C te vlažnim i blagim zimama s rasponom srednjih temperatura zraka 7,9 do 10,7 °C. Srednja godišnja temperatura zraka iznosi 16,3 °C. Siječanj je najhladniji mjesec s prosječno 7,9 °C, dok je srpanj najtopliji s prosječno 25,9 °C [21]. Najniža je temperatura izmjerena 23. siječanj 1963. godine i iznosila je -9 °C, dok je 5. srpnja 1950. godine izmjerena najviša temperatura od 38,6 °C. Godišnje ima prosječno 122 dana s oborinama (godišnji prosjek 188 mm) [21]. Dominantni vjetrovi u zimskom periodu su bura i jugo, koji pušu s učestalošću od 35 do 55 % godišnje [22], dok je ljeti dominantan vjetar maestral. Jadransko more predstavlja

prirodni izvor zaliha vode čija je temperatura u rasponu 10 do 26 °C i najvažniji je regulator klime šireg područja regije [23].

Područje ovog istraživanja je metropolitansko ili šire gradsko područje, koje obuhvaća urbani prostor, predgrađa i prigradska naselja te okolne gradove i manja mjesta, obično formirano oko grada s velikom koncentracijom stanovništva (populacije najmanje 100.000 stanovnika) [24]. U istraživanju UTO je uzeto metropolitansko područje grada Splita. Zračna udaljenost krajnjih točaka metropolitanskog područja (Trogir - Omiš) je skoro 70 km duž obale (slika 3.).

Prema popisu stanovništva 2011. godine, grad Split je imao 178.102 stanovnika, a oko 349.314 živi u metropolitanskom području grada [25]. Gustoća stanovništva je 2244/km² (u samom gradu gustoća je 7499/km²) [26].



Slika 3. Metropolitansko područje grada Splita

Splitsko gospodarstvo je u porastu otprilike za 6 %, pa grad postaje najbrža rastuća ekonomija u Republici Hrvatskoj. Nagla se gospodarska aktivnost također odražava na klimatskim prilikama grada.

3. Materijali i metode

Kako bi se otkrili urbani toplinski otoci i procijenile temperature zraka i površinske temperature tla, znanstvenici primjenjuju različite metode mjerenja: direktne, indirektna i fizikalnog modeliranja.

1. Direktne metode uključuju:

- Točkasta mjerenja temperature zraka koja se obavljaju pomoću fiksnih digitalnih meteoroloških stanica postavljenih na 1,5 do 2 metra visine (prema preporukama World Meteorological Organization - WMO) [3], dok se promjene temperature zraka po visini najčešće mjere pomoću senzora montiranih na visokim stupovima [12] (*in situ* ili Eulerova metoda). Prednosti su takvih mjerenja velika točnost podataka kojima se dobivaju vremenski nizovi (dobre vremenske razlučivosti), a nedostaci su mala prostorna razlučivost i visoka cijena.
- Mjerenje temperature zraka pomoću pokretnih senzora montiranih na pokretnoj platformi ili vozilu koje se giba horizontalno po prostoru (Lagrangeova metoda). Mjerenja promjene temperature zraka po visini se obavljaju senzorima montiranim na balonima ili zrakoplovima [12].

2. Od indirektnih metoda najčešće se primjenjuje metoda daljinske detekcije pomoću koje se određuje temperatura površine tla (potpoglavlje 3.1).
3. Metoda fizikalnog modeliranja površinske temperature zraka na malim prostornim skalama primjenjuje se na način da se izrađuju makete urbanih prostora koje zamjenjuju realni prostor. Na modelu se simuliraju fizikalni procesi iz prirode i mjeri temperatura zraka na fizikalnom modelu [27].

Površinski UTO-i, koji se identificiraju indirektnim metodama mjerenja (daljinska detekcija), obično se ilustriraju termalnim slikama. Atmosferski UTO-i se identificiraju direktnim mjerenjima na meteorološkim stanicama ili pokretnim toplinskim senzorima, a ilustriraju se izotermnim kartama ili temperaturnim grafovima [17].

U znanstvenoj literaturi razvijene su različite vrste modela, kojima je cilj otkriti fizikalne procese, koji dovode do promjena temperatura zraka i tla, pa time i UTO-a, na različitim prostornim i vremenskim skalama. Fizikalni su procesi na urbanim područjima kombinacija kompleksnih i raznolikih fenomena, koji su u interakciji. Stoga se izrađuju modeli na kojima su pojednostavljeni fizikalni procesi, čime se minimizira kompleksnost samog modela, procesa i vremena potrebnog za računalnu obradu. Modeli UTO-a na urbanim područjima istražuju se na različitim prostornim skalama [27, 28]:

1. prostorna skala zgrade, poznata i kao energetski model zgrade, razvija se radi predviđanja potrošnje energije za hlađenje i zagrijavanje
2. kod mikroskalnih modela se analizira interakcija zgrade sa susjednim okolišem, što je osnova za razvijanje mikroklimatskih modela najčešće korištenih u graditeljstvu i arhitekturi
3. modeli fizikalnih procesa, pa tako i pojava UTO-a na skalama velikih gradova (mezoskalni modeli) se najčešće koriste u meteorologiji i urbanoj klimatologiji, ti su modeli zasnovani na metodi rješavanja jednadžbi dinamike fluida [28].

U ovom se radu koristila metoda satelitske daljinske detekcije na prostornoj skali šireg područja grada Splita.

3.1. Termalna daljinska detekcija

Platforme i metodologije koje se najčešće koriste za određivanje površinske topline urbanih i ruralnih područja su, prema [29]:

1. sateliti pomoću kojih se postiže širok prostorni obuhvat snimanja, ali vremenski intervali mogu biti ograničeni. Na podatke utječu meteorološki uvjeti i atmosfera [30]
2. zrakoplovi koji daju visoku prostornu razlučivost i više detalja urbanih objekata. Manjkavosti su im visoka cijena, nepravilna pokrivenost te nestandardizirani proizvodi
3. terestrički senzori koji mogu dati jedinstvenu perspektivu nekih urbanih karakteristika, a njima se može postići i visoka vremenska razlučivost i izbjeći korekcije atmosferskih utjecaja.

Osnovne karakteristike senzora koji se koriste za određivanje površinske temperature [30]:

1. Sateliti (prostorna i vremenska razlučivost termalnog kanala senzora):
 - a) GOES (4 km - svakih 15 min)
 - b) AVHRR (1,1 km - dva prolaza dnevno)
 - c) MODIS (1 km - 1-2 dana)
 - d) Landsat (120 ili 60 m - 16 (8 na širini 45°) dana) [31, 32]
 - e) ASTER (90 m - 16 dana)
2. Avio/termalni skener (prostorna razlučivost ovisi o kvaliteti senzora i visini leta);
3. Terestrički/infracrveni termometarski senzori (prostorna razlučivost - određena kvalitetom senzora i udaljenošću od objekta snimanja).

Prvo opažanje površinskih termalnih otoka (pomoću satelitskih senzora) publicirano je 1972. godine [33]. Otada se različiti satelitski senzori koriste za opažanje temperature urbanih površina. Danas mnogi autori najčešće koriste Landsat termalne podatke za računanje površinske temperature tla. Za potrebe određivanja temperature tla u ovom radu odabrana je upotreba Landsat satelitskih podataka, jer imaju dobru prostornu razlučivost i dostupni su za korištenje bez naknade (ASTER podaci nisu besplatni niti dostupni). Sve ostale satelitske misije imaju bolju vremensku, ali lošiju prostornu rezoluciju, pa je njihovo korištenje manje prikladno za realizaciju osnovnog cilja ovog rada.

Za potrebe ovog rada nisu bili dostupni podaci i rezultati korištenja ostalih platformi i metoda istraživanja UTO-a (zrakoplovni, terestrički i ostali senzori), a autorima nije poznato da su se na području Republike Hrvatske (a time i šireg područja grada Splita) obavljala takva istraživanja. Pri tome je važno istaknuti da su na užem području grada Rijeke obavljena mjerenja površinske temperature prometnica, što ne daje potpunu sliku površinske temperature tla cjelokupnog urbanog područja [7].

Landsat satelitska misija ima ograničenja za računanje površinske temperature tla. Satelit se nađe iznad područja istraživanja svakih osam dana u 9:42 sati (UTC). Razdoblje dana s maksimalnom površinskom temperaturom je od 14 do 18 sati [7, 17]. Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) i Thermal infrared (TIR) podaci imaju sedam spektralnih kanala, od kojih šesti kanal (Band 6) zapisuje emitiranu energiju u termalnom infracrvenom dijelu spektra (10,40 do 12,50 nm), pa se koristi za studije UTO lokalnih mjerila [28]. Prostorna razlučivost slikovnog elementa (piksel) na kanalu 6 je 120 m i 60 m. Ostali kanali imaju prostornu razlučivost 30 x 30 m po pikselu. Landsat 8 ima dva osnovna senzora: Operational Land Imager (OLI; vidljiva, bliža IC i srednja IC) i Thermal Infrared Sensor (Thermal IC - TIR) s razlučivošću od 100 m. Landsat8/TM podaci snimaju područje grada Splita u 9:42 sati (UTC).

Sateliti koji se koriste za opažanje dijelova Zemljine površine direktno mjere zračenje gornjeg dijela atmosfere (eng. *top of the atmosphere* - TOA) [4] u vrlo uskom kratkovalnom spektralnom

području (0,2-5 μm) i dugovalnom spektralnom području (5-100 μm) elektromagnetskog zračenja, koje pokriva oko 99,5 % ukupne toplinske energije emitirane sa Zemlje. Postupak računanja površinske temperature tla opisan je u poglavlju 4.

3.2. Meteorološki podaci

Za potrebe ovog rada korišteni su podaci temperature i tlaka zraka te relativne vlage izmjereni na meteorološkoj stanici Split-Marjan ($\phi = 45,5^\circ\text{N}$; $\lambda = 16,4^\circ\text{E}$; $h = 125\text{ m}$) za odabrane meteorološke situacije (tablica 1.), kao i temperature tla izmjerene na 2 cm na istoj stanici (tablica 2.). Dobiveni podaci su vlasništvo Pomorskog meteorološkog centra iz Splita i Državnog hidrometeorološkog zavoda iz Zagreba. Meteorološki su podaci prije daljnje obrade uspoređeni sa slobodnim podacima meteorološke stanice u Kaštelima, radi izbjegavanja mogućih grubih pogrešaka. Navedeni su podaci korišteni za određivanje parametara atmosferske korekcije zadanih Landsat 7 i 8 scena. Prema mjerenjima temperature zraka pokazalo se da je ljeto 2015. godine bilo najtoplije otkad postoje mjerenja. Nažalost, očekuje se nastavak ovako ekstremnih temperaturnih vrijednosti [34].

3.3. Odabir primjerenih Landsat satelitskih snimaka

Standardne Landsat proizvode distribuira United States Geological Survey's Earth Resources Observation and Science Center (USGS EROS) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), a sadrže grubo obrađene i kalibrirane (geokodirane) multispektralne snimke snimljene Operational Land Imager (OLI) i Thermal Infrared (TIR) senzorima. Za potrebe ovog rada odabrane su 2 Landsat 8 OLI/TIR scene, snimljene 12. srpnja i 17. studenog 2015. te dvije Landsat ETM+ scene snimljene 2. kolovoza 2000. i 19. veljače 2001. godine. Scene su odabrane tako da predstavljaju po jednu karakterističnu zimsku i ljetnu meteorološku epizodu (pretpostavka je najveći temperaturni raspon) na početku novog tisućljeća (početak Landsat 7 misije) i 2015. godine, koju je Svjetska meteorološka organizacija [35] proglasila najtoplijom godinom otkad postoje meteorološka mjerenja.

Svi postupci predobrade i obrade Landsat scena obavljani su u računalnom programu ArcGIS 10.3. Landsat satelitske scene preuzorkovane su metodom kubne konvolucije, tako da budu orijentirane prema sjeveru i georeferencirane u projekcijski koordinatni sustav univerzalne poprečne Mercatorove projekcije (UTM 33N) na rotacijskom elipsoidu WGS84 (EPSG:32633) te pohranjene u GeoTIFF formatu. Landsat 7 i 8 scene u USGS EROS arhivama dostupne su svim korisnicima potpuno besplatno i bez ikakvih ograničenja. Završna dorada dobivenih rasterskih karata i podataka je obavljena u Adobe Photoshop CS6 programu.

3.4. Atmosferska korekcija

Prije obrade satelitskih snimaka napravljena je predobrada koja podrazumijeva eliminaciju atmosferskih raspršenja na

snimci. Kako je poznato, Landsat TM, ETM+ i TIR daju termalnu infracrvenu sliku visoke prostorne rezolucije Zemljine površine (svaki piksel na sceni) zasnovanu na radijanci vrha atmosfere (eng. *Top of Atmosphere* - TOA), što ne uključuje atmosfersku korekciju. Atmosferska korekcija je metoda kojom se iz podataka termalne slike na vrhu atmosfere (TOA), koji se dobivaju iz Landsatovih snimaka, izračunava površinska temperatura tla. Za računanje parametara atmosferske korekcije, atmosferska transmisija te uzlazne i silazna radijanca trebaju biti poznate ili modelirane za određeni prostor.

U radu je primijenjena metoda određivanja atmosferskih parametara na osnovi zadane temperature, tlaka i vlage u zraku. Atmosferska korekcija za lokaciju Splita, odabrani datum i vrijeme, izračunani su pomoću modela koji koristi globalne atmosferske profile, modeliranom u National Centers for Environmental Prediction (NCEP) [36]. Ovom je metodom "grubo" određen parametar atmosferske korekcije [36], budući da je za proračun atmosferske korekcije potrebno poznavati stvarni vertikalni profil atmosferskih parametara iznad Splita (atmosferska transmisija, uzlazna i silazna radijanca) umjesto modeliranih vrijednosti koje daje NCEP model. Prema dosada obavljenim istraživanjima [36] u kojima su se uspoređivale vrijednosti modeliranih i mjerenih vertikalnih profila temperature atmosfere (koji se koriste za proračun atmosferske korekcije), pokazalo se da se razlike temperature zraka kreću u rasponu od $\pm 2^\circ\text{C}$.

Nakon modeliranja globalnih atmosferskih profila, kao i površinske temperature, uz poznavanje tlaka i relativne vlage, moguće je konvertirati prostorno dolaznu u prostorno odlaznu radijancu, izraz (1):

$$L_{TOA} = \tau \varepsilon L_T + L_u(1 - \varepsilon)L_d \quad (1)$$

gdje je:

τ - atmosferska transmisija

ε - emisivnost površine

L_T - radijanca kinetičke temperature crnog objekta T

L_u - uzlazni ili atmosferski put radijanca

L_d - silazna ili nebeska radijanca,

L_{TOA} - prostorni doseg ili TOA radijanca mjerena instrumentom.

Napomena: Radijanca se iskazuje $\text{W/m}^2\text{-ster}\cdot\mu\text{m}$, a prijenos i emisivnost su bez jedinica.

Radijanca je pretvorena u temperaturu pomoću Planckove jednadžbe. Detalji računanja atmosferske korekcije prikazani su u [37, 38]. Zanimljivo je da atmosferske korekcije može rezultirati sustavnim pogreškama u predviđanju površinske temperature tla. Treba napomenuti da je izračunata površinska temperatura bez primjene NCEP modela atmosferskih profila za računanje atmosferske korekcije, temperatura 5 do 10 $^\circ\text{C}$ niža.

Površinski meteorološki parametri meteorološke postaje u Splitu, kao i atmosferski korekcijski parametri (atmosferska transmisija te uzlazna i silazna radijanca) za odabrane datume i vrijeme prikazani su u tablici 1. U tablici 2. prikazane su temperature

Tablica 1. Zadani meteorološki i izračunani parametri atmosferske korekcije za odabrane datume u 9:42 sati UTC

Datum	Meteorološki parametri			Atmosferske korekcije		
	Temperatura zraka [°C]	Vlaga [%]	Tlak [mb]	Atmosferska transmisija	Uzlazna radijanca	Silazna radijanca
17.11.2015.	16	66	1021	0,97	0,37	0,63
12.7.2015.	27,8	32	1015	0,80	1,66	2,76
2.8.2000.	27	34	1021	0,80	1,59	2,61
19.2.2001.	8	57	1012	0,87	0,77	1,29

Tablica 2. Temperature zraka i tla na odabrane datume na meteorološkoj stanici Split Marjan

Datum	Temperatura zraka [°C]			Temperatura tla [°C]		
	7h	14h	21h	7h	14h	21h
17.11.2015.	7,0	19,0	12,0	7,0	11,2	8,5
12.7.2015.	22,0	30,7	26,0	29,8	44,2	29,2
2.8.2000.	20,0	29,0	24,0	23,2	51,6	25,8
19.2.2001.	7,0	12,0	6,0	4,1	7,1	4,2

zraka mjerene na meteorološkoj kućici meteorološke stanice Split Marjan, dok je temperatura tla mjerena na istoj stanici na 2 cm dubine. Iz tablice 2. je vidljivo da su u istim terminima temperature tla u pravilu manje od temperature zraka u hladno doba godine, dok su ljeti temperature tla znatno veće i temperature zraka sredinom dana (14 sati) te dostižu vrijednosti iznad 50 °C. Visoke temperature zraka i tla, a posebno one iznad 36 °C negativno utječu na ljusko zdravlje, jer je pri takvim temperaturama tijelu onemogućeno hlađenje.

3.5. Pretvaranje digitalnih brojeva u temperaturu

3.5.1. Konverzija digitalnog broja u radijancu vrha atmosfere

Podaci OLI i TIRS kanala mogu se pretvoriti u spektralnu radijancu vrha atmosfere pomoću faktora skaliranja radijance navedenog u datoteci metapodataka [37]:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (2)$$

gdje je:

L_{λ} - spektralna radijanca vrha atmosfere (Watts/(m²*srad*μm))
 M_L - specifična multiplikacijska konstanta kanala iz datoteke metapodataka

A_L - specifična adicijska konstanta kanala iz datoteke metapodataka

Q_{cal} - cjelobrojna i kalibrirana standardna vrijednost slikovnog elementa (digital number - DN).

3.5.2. Konverzija radijance u refleksiju vrha atmosfere

Podaci OLI kanala mogu biti konvertirani u planetarnu refleksiju vrha atmosfere pomoću koeficijenta refleksije koji se nalazi u datoteci metapodataka (MTL file). Sljedeća se jednadžba koristi

za konverziju DN vrijednosti u refleksiju vrha atmosfere za OLI podatke, izraz (3):

$$\rho_{\lambda}' = M_p Q_{cal} + A_p \quad (3)$$

gdje je:

ρ_{λ}' - planetarna refleksija vrha atmosfere, bez korekcije za solarni kut

M_p - multiplikacijska konstanta refleksije za pojedini kanal dostupna u datoteci metapodataka

A_p - specifična adicijska konstanta za pojedini kanal iz datoteke metapodataka

Q_{cal} - ugrubo predobrađena i kalibrirana standardna vrijednost slikovnog elementa (digital number - DN).

3.5.3. Refleksija vrha atmosfere s korekcijom za solarni kut

Refleksija vrha atmosfere s korekcijom za solarni kut iznosi:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\cos(\Theta_{SZ})} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\cos(\Theta_{SE})} \quad (4)$$

gdje je:

ρ_{λ} - planetarna refleksija vrha atmosfere

Θ_{SE} - lokalni kut visine Sunca. Kut visine Sunca (eng. *sun elevation*) središta scene u stupnjevima nalazimo ga u metapodacima

Θ_{SZ} - lokalni solarni zenitni kut; $\Theta_{SZ} = 90^\circ - \Theta_{SE}$

Za točnije računanje refleksije potrebno je poznavati solarni kut za svaki piksel, koji se može zamijeniti sa solarnim kutom sredine scene. Solarni zenitni kut piksela sredine scene se može dobiti u metapodacima Landsat snimke.

3.5.4. Konverzija satelitskog odsjaja temperature

Radijanca temperaturne pretvorbe može biti obavljena uz pomoć Planckove jednadžbe [40]. Podaci TIRS kanala mogu biti konvertirani od spektralni odsjaj (radijancu) na odsjaj temperature pomoću termalne konstante koju nalazimo u datoteci metapodataka:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (5)$$

gdje je:

- T - satelitski odsjaj temperature (K)
- L_λ - TOA spektralna radijanca ($\text{Watts}/(\text{m}^2 \cdot \text{srad} \cdot \mu\text{m})$)
- K_1 i K_2 - specifične termalne konstante konverzije kanala i iznose $K_1 = 666,09$ i $K_2 = 1282,71$ za Landsat 7 podatke, a za kanal 10 Landsat 8 one iznose $K_1 = 774,88$ i $K_2 = 1321,08$.

3.6. Nenadzirana klasifikacija

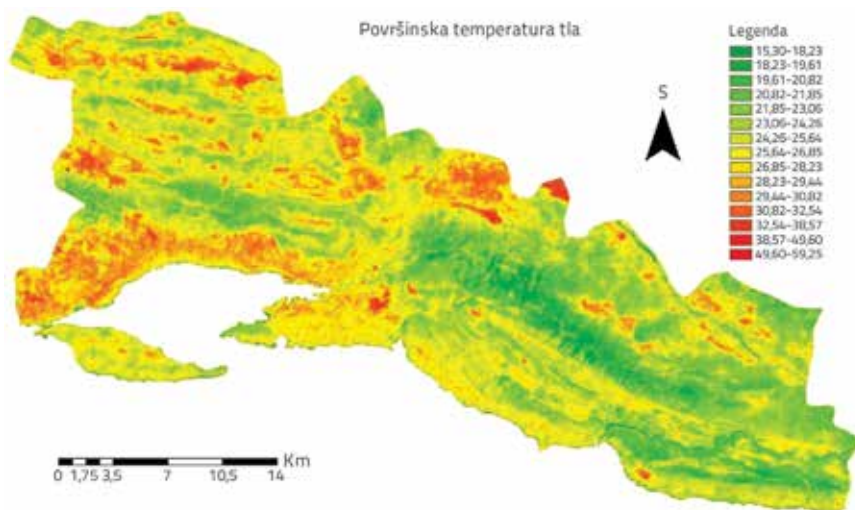
Dva su termalna kanala na Landsat 8 satelitu i oba imaju prostornu rezoluciju od 120m. Termalni kanal broj 11 je prema Landsat operacijskom priručniku kalibracijski nesiguran, pa se u ovom radu koristio samo termalni kanal 10. Nakon termalne obrade kanala, temperature su klasificirane u 15 klasa, otprilike po 1 °C, jer se taj broj klasa pokazao kao najčitljiviji. Iz područja su "maskirani" oblaci ako se nalaze na prikazanom području. Jednako tako se čitljivijom pokazala nenadzirana klasifikacija negoli nadzirana, jer različiti datumi imaju različite temperaturne raspone.

4. Rezultati i rasprava

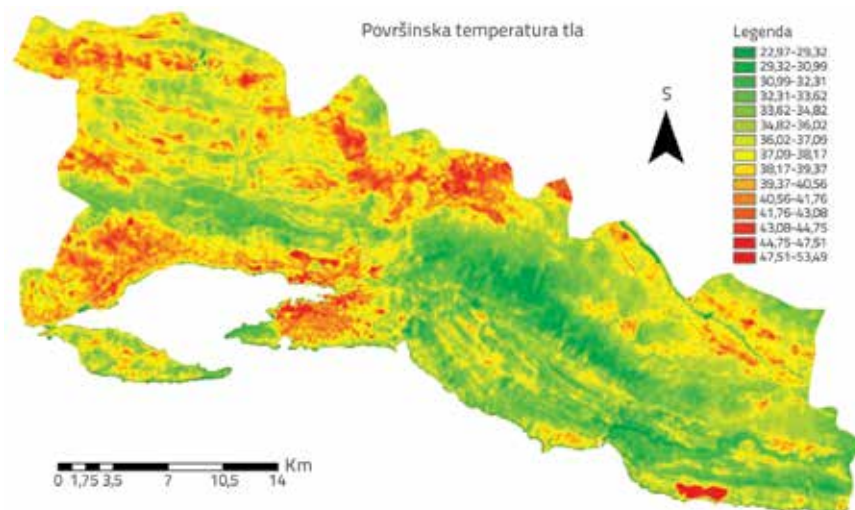
Značajne klimatske promjene utječu na mnoga područja: vodne resurse, ekonomiju, ljudsko zdravlje, potrošnju energije i društvene čimbenike [41, 42]. Na slici 4. prikazana je površinska temperatura tla na početku kolovoza 2000. godine, a koja je u 9:42 sati UTC za metropolitansko područje grada Splita bila u rasponu od 15,30 do 59,26 °C. Područja na kojima su zabilježene najveće temperature od 40 do 50 °C su: odlagalište smeća Karepovac (istočno od Splita), južni dio Sinjskog polja na sjeveroistoku te jugoistočni dio industrijske zone u Dugopolju. Na

snimci se, također, može detektirati relativno manje područje (oko 500 metara promjera), u blizini zaselka Divojevići u općini Lečevica na kojem je temperatura iznosila 50 do 59 °C. Toplina na ovom području je neobjašnjivo znatno veća od okolnog područja i najvjerojatnije je nastala zbog manjeg požara ili paljenja trave na tom području.

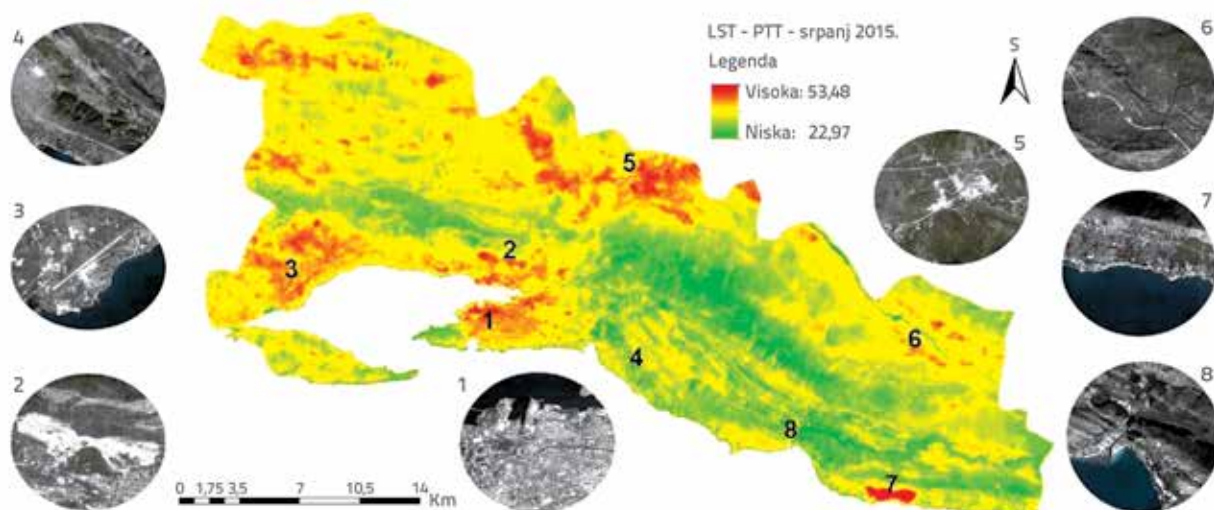
Površinska temperatura tla snimljena je sredinom srpnja 2015. godine (slika 5.), u ljetnom periodu kao i prethodna snimka. Obradom podataka termalnog kanala određene su površinske temperature tla za metropolitansko područje Splita, koje iznose od 22,97 do 53,49 °C. Na snimci se, također, može detektirati nekoliko područja čija je temperatura znatno veća od okolnih područja. Četiri takva karakteristična područja, koja predstavljaju karakteristične detalje ljetnih scena, prikazana su odvojeno na slici 7. Područja s temperaturom većom od okolne ili toplinski otoci na ovoj sceni su područja kamenoloma na



Slika 4. Obradena satelitska scena Landsat7 2. kolovoza 2000. za metropolitansko područje grada Splita, površinska temperatura tla bila je u rasponu od 15,3 do 59,3 °C



Slika 5. Obradena satelitska scena Landsat8 12. srpnja 2015. za metropolitansko područje grada Splita, površinska temperatura tla bila je u rasponu od 23,0 do 53,5 °C



Slika 6. Pozicije karakterističnih područja na ljetnoj snimci iz 2015. godine

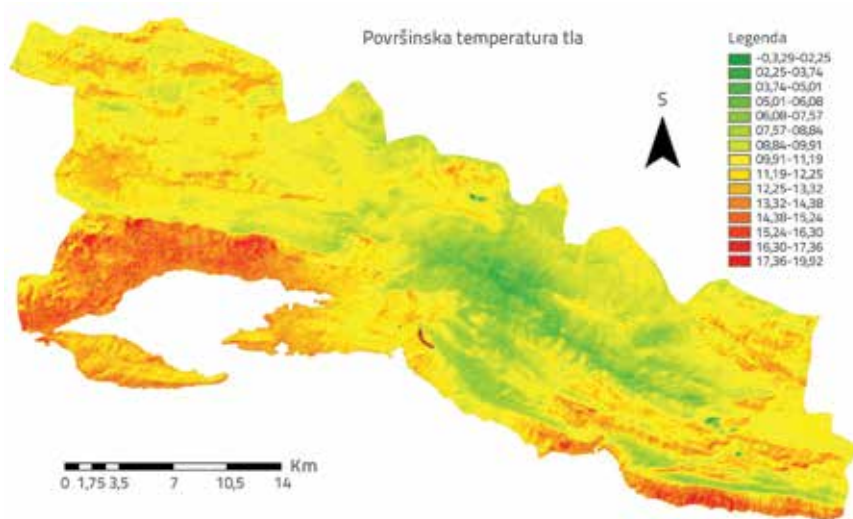
2. kolovoza 2000.	12. srpnja 2015.	Google Earth (Digital Globe) 14. prosinca 2015.

Slika 7. Karakteristična područja na ljetnim scenama 2000. i 2015. godine, detalji pojedinih područja uspoređeni su s Google Earth preglednikom

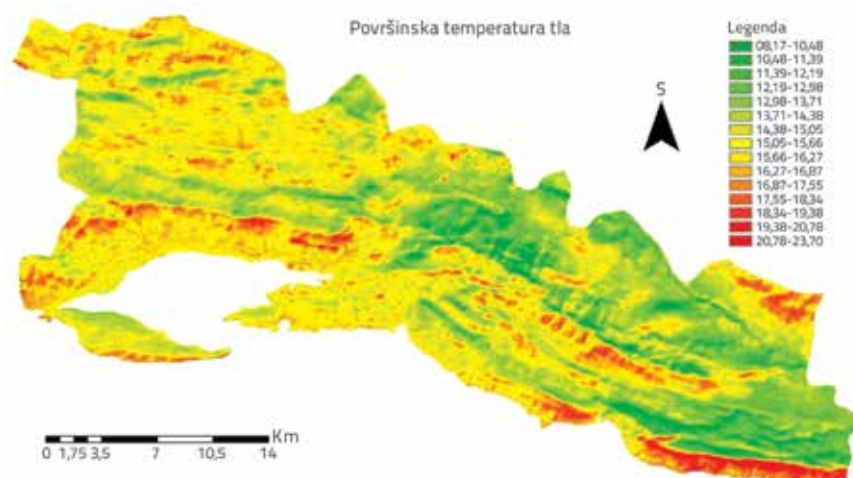
obroncima zapadnog (Plano) i istočnog dijela Kozjaka, i zapadnog dijela Mosora (Perun) te odlagalište otpada Karepovac. Toplinske otoke predstavljaju i područja požarišta, čija je vegetacija privremeno ogoljena (Plano iznad Trogira i Lokva Rogoznica istočno od Omiša). Južni dio Sinjskog polja ima temperaturu oko 45 °C kao i 2000. godine. Na slici 5. se može vidjeti da su područja oko prometnica, osobito oko autoceste, znatno toplija od okolnog područja te predstavljaju toplinske otoke.

Nadalje, na slici 5. se vidi kako je sjeverni dio splitskog poluotoka znatno topliji od južnog dijela grada, što je posljedica ohlađivanja koje dolazi s mora (temperatura mora je znatno manja od temperature kopna, a uslijed te činjenice se javlja vjetar koji puše s mora na kopno (smorac). Na slici se može vidjeti da je hladnija zona koja prati obalu veća na južnom dijelu (iznosi oko 250 – 300 m) negoli na sjevernom dijelu (oko 100 m) splitskog poluotoka. Jednako tako je vidljivo da je južni dio poluotoka hladnija od sjevernog dijela. Sjeverni, a naročito sjeverozapadni dio grada je industrijski s brodogradilištem, trgovačkom lukom i nekoliko pogona, pa je stoga površinska temperatura tla tog područja izrazito velika i iznosi od 40 do 50 °C nešto prije 10 sati. Temperatura tla se znatno povećava za vrijeme maksimalne dnevne temperature poslije 16 sati. Jednako tako je vidljivo da je centar grada Trogira i donjih Kaštela znatno topliji od centra grada Splita, a razlog bi mogao biti gusta izgradnja tog područja i nedostatak zelenih površina. Industrijska zona u Dugopolju također je znatno toplija od okolnog ruralnog područja.

Na slici 6. izdvojeno je osam karakterističnih područja koja predstavljaju toplinske otoke u srpnju 2015. godine: područje 1 prikazuje industrijsku zonu sjeverozapadnog dijela grada Splita s brodogradilištem; područje 2 je kamenolom na jugoistočnom dijelu Kozjaka; područje 3 je aerodrom Resnik i trogirsko prigradsko naselje Plano s dijelom opožarenog područja (istočno); područje 4 je zaobalno mjesto Srinjine s nešto nižom temperaturom, za razliku od ostalih područja; područje 5 prikazuje industrijsku zonu općine Dugopolje s prometnim čvorom priključka na autocestu; područje 6 prikazuje tok rijeke Cetine i trasu autoceste; područje 7 prikazuje opožareno područje Lokve Rogoznice; područje 8 prikazuje općinu Omiš i ušće rijeke Cetine u more. Termalne karakteristike tih područja već su opisane, a temperature tla se mogu vidjeti na slikama 5. i 7.



Slika 8. Obrabljena satelitska scena Landsat7 19. veljače 2001. za metropolitansko područje grada Splita, površinska temperatura tla bila je u rasponu od -3,2 do 19,9 °C



Slika 9. Obrabljena satelitska scena Landsat8 17. studenog 2015. za metropolitansko područje grada Splita, površinska temperatura tla bila je u rasponu od 8,1 do 23,7 °C

Na slici 7. prikazana su uvećana četiri karakteristična područja UTO-a na dvije Landsat scene snimljene prije i poslije globalnog zatopljenja i isti prikaz s Google Earth preglednika. Gornja scena prikazuje splitski poluotok, na kojem se lijepo vide formirani UTO-i i hladnija područja marjanske šume te područja obalne zone (utjecaj temperature mora). U drugom redu je prikazano područje aerodroma Resnik s većom temperaturom piste i ceste, naseljenog područja te nedavno opožarenih područja. U sljedećem redu je prikazano područje autoceste koja se proteže uz rijeku Cetinu. Na tom području 2000. godine autocesta nije bila izgrađena, pa se na snimci vide lokalne prometnice koje su toplije od okolnog područja i tok rijeke Cetine koji je hladniji. U zadnjem je redu prikazano područje prigradskog naselja i industrijske zone Dugopolje, koja se u posljednjih deset godina jako razvila, što se vidi i na površinskim temperaturama tla, koje su kvalitativno i

kvantitativno različite od onih a početka tisućljeća, odnosno prije globalnog zagrijavanja.

Radi jasnijeg prikaza površinskih temperatura tla, obrađene su i dvije zimske scene. Na slici 8. prikazana je Landsatov snimak nastao 19. veljače 2001., s temperaturama u rasponu od -3 do 19 °C, a na slici 9. je prikazana scena snimljena 11. studenog 2015. s temperaturnim rasponima od 8 do 23 °C. Na prvi je pogled vidljiva globalna promjena temperature na tim dvjema scenama. Na zimskim je scenama dobro vidljiva oštra raspodjela klimatskih prilika, gdje se površinske temperature tla znatno razlikuju ispred i iza planinskog masiva Kozjaka, Mosora i Biokova. Na zimskim se scenama toplinski otoci javljaju uglavnom na ogoljenim kamenim terenima čija je temperatura nešto veća od okolnog područja.

Osim toga su vidljive temperaturne razlike na morskoj površini, kao posljedica dotoka slatke vode (niža temperatura) koje donose rijeke Jadro, Žrnovnica i Cetina, kao i vrulje koje izbijaju na morskom dnu. Ove pojave nisu prikazane jer je obrada satelitskih snimaka namjenski bila fokusirana na kopno, a ne i na temperaturu mora, koja znatno utječe na kopnene temperature.

5. Zaključak

Određivanje površinske temperature tla metropolitanskog područja Splita metodom satelitske detekcije pokazalo je da su se posljednjih godina pojedini dijelovi urbanog područja termalno uvelike promijenili. Naime, na tom je području zabilježeno povećanje temperature tla i pojava urbanih toplinskih otoka, a manje su se mijenjale temperature tla ruralnih područja.

U posljednjih se nekoliko desetljeća gradsko područje Splita proširilo na okolne površine pod vegetacijom, pa je urbano područje izgubilo velik dio zelenih površina. Značajan dio zelenih površina izgubljen je urbanizacijom, razrjeđivanjem vegetacije u zelenim zonama, a u okolnim ruralnim područjima zelene površine su izgubljene kao posljedica šumskih požara (Plano, Lokva Rogoznica) tijekom ljetnih mjeseci. Nestanak zelenila utječe na evapotranspiraciju i termalne karakteristike šireg urbanog područja. Dakle, može se s velikom vjerojatnošću pretpostaviti da su se toplinske karakteristike grada Splita znatno promijenile u posljednjih nekoliko godina kao posljedica brze neplanske urbanizacije i značajnih klimatskih promjena.

Zabilježene su zabrinjavajuće pojave urbanih termalnih otoka, posebno u ljetnim mjesecima, kada u gradu, kao turističkom centru, obitava znatno veći broj ljudi.

Budući da se metodom daljinske detekcije dobila površinska temperatura tla metropolitanskog područja Splita prostorne razlučivosti oko 100 m, tom su se metodom otkrili UTO-i prostorne skale 100 m (npr. brzorastuće industrijske zone Dugopolje ili područje oko Sjeverne luke Split). Prednost je ove metode što su podaci besplatni i svima dostupni, nedostatak je osmodnevna vremenska razlučivost podataka, koji se snimaju malo prije 10 sati, što se ne poklapa s dnevnim temperaturnim maksimumom. Satelitske snimke prikazuju područje nešto manje od 200 km, pa se stoga može reći da je to najveća prednost ove metode u odnosu na ostale metode otkrivanja UTO-a.

Iz literature [27, 28] je poznato da se UTO-i mogu pojaviti i na prostornim skalama manjim od 100 m, kao što su na primjer prostorna skalajedne zgrade ili više zgrada sa susjednim okolišem (mikroskala). Stoga se može zaključiti da se metoda satelitske detekcije temperature tla primijenjena u ovom radu ne može primijeniti za otkrivanje kritičnih područja (UTO-a) na mikroskali (mikroklima gradskog područja). Da bi se u budućnosti mogla preciznije odrediti kritična temperaturna područja, preporučuje se metodu satelitske detekcije kombinirati sa svim metodama opisanim u poglavlju 3, a naročito s direktnim mjerenjima temperature tla i zraka na meteorološkim stanicama, koje bi bile raspoređene na prostornoj skali manjoj od 100 metara. Tako bi se dobio veliki broj podataka i oni bi mogli poslužiti za verificiranje modela, koji se zasnivaju na metodama rješavanja jednadžbi dinamike fluida.

Na osnovi svih navedenih rezultata ovog rada može se općenito zaključiti da je u budućim istraživanjima potrebno različitim metodama detaljnije proučiti uzroke pojavljivanja UTO-a kako bi se promijenilo i ublažilo postojeće stanje u prostoru te odredile mjere zaštite okoliša i smjernice za novu gradnju.

Zahvala

Autori najljepše zahvaljuju Pomorskom meteorološkom centru u Splitu Državnog hidrometeorološkog zavoda u Zagrebu na ustupljenim meteorološkim podacima, bez kojih kvalitetna obrada podataka ne bi bila moguća.

LITERATURA

- [1] Aniello, C.: Mapping Micro-urban Heat Islands Using LANDSAT TM and a GIS, *Computers & Geosciences*, 21 (1995) 8, pp. 965-967.
- [2] Emery J., Oke T., Roth, M.: Satellite-Derived Urban Heat Islands from Three Coastal Cities and the Utilization of Such Data in Urban Climatology, *International Journal of Remote Sensing* (1989) 10, pp. 1699-1720, <https://doi.org/10.1080/01431168908904002>
- [3] Oke, T.R.: *Boundary layer climates*, 2nd Methuen, (1987).
- [4] Voogt, J.A., Oke, T.R.: Thermal remote sensing of urban climates, *Remote Sensing Environmental*, 86 (2003), pp. 370-384, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- [5] Jimenez-Munoz, J.C., Sobrino, J.: A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data, *Journal of Geophysical Research*, 108 (2004) 22, pp. 4688.

- [6] Oke, T.R.: Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods, IOM Report No. 81, WMO/TD-No. 1250, (2006).
- [7] Babić, S., Deluka-Tibljaš, A., Cuculić, M., Šurdonja, S.: Analysis of pavement surface heating in urban areas, GRAĐEVINAR, 64 (2012) 2, pp. 127-134.
- [8] Voogt, J.A.: Urban Heat Island (Chapter), Encyclopedia of Global Environmental Change (Munn, T., ed.), 3 (2002), pp. 660-666 (Chichester: Wiley).
- [9] Nuruzzaman, Md.: Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 3 (2015) 2, pp. 67-73.
- [10] De Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tremeac, B., Merchat, M., Poeuf, P., Marchadier, C.: How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France?, International Journal of Climatology, 33 (2013) 1, pp. 210 - 227.
- [11] Santamouris, M., Paraponiaris, K., Mihalakakou, G.: Estimating the ecological footprint of the heat island effect over Athens, Greece, Climatic Change, 80 (2007), pp. 265-276, <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9128-0>
- [12] Gartland, L.: Heat Islands Understanding and Mitigating Heat in Urban Areas, Earthscan, 2008.
- [13] EPA: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Urban Heat Islands Basics, Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2008
- [14] EPA, Heat Island Effect, <http://www.epa.gov/heatisland/about/index.htm>
- [15] Voogt, J.A.: Image representations of complete urban surface temperatures, Geocarto International, (2000) 15, pp. 19-30, <https://doi.org/10.1080/10106040008542160>
- [16] Voogt, J. A.: Urban heat islands: hotter cities. America Institute of Biological Sciences, 2004.
- [17] Prashad, L.: Urban heat islands in Encyclopedia of remote sensing (ed. Njoku, E.G.), Springer, 2014.
- [18] Bonacci, O.: Analysis of mean annual air temperature series in Croatia, GRAĐEVINAR, 62 (2010) 9, pp. 781-791.
- [19] Oke, T.R.: Urban environments (Chapter), Surfaces Climates of Canada (Rouse, W.R. ed.), McGill-Queen's University Press, (1997), pp. 303-327.
- [20] Emeis, S.: Surface-Based Remote Sensing of the Atmospheric Boundary Layer, Springer, 2011., <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9340-0>
- [21] DHMZ: Klimatski atlas Hrvatske - Climate atlas of Croatia, 1961-1990 - 1971-2000 (ed. Zaninović, K.), Državni hidrometeorološki zavod, 2008.
- [22] DHMZ: Klima Hrvatske - Srednje mjesečne vrijednosti za postaju Split Marjan u razdoblju 1948-2014., <http://klima.hr/>.
- [23] Penzar, B., Penzar, I., Orlić, M.: Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana, Dr. Feletar & Hrvatski hidrografske institut, Zagreb, (2001), pp. 258.
- [24] UNICEF: The State of the World's Children - Children in an increasingly urban world, (2012), <http://www.unicef.org/sowc2012/pdfs/SOWC-2012-DEFINITIONS.pdf>
- [25] DZS: Popis stanovništva, kućanstava i stanova 2011. godine, Državni zavod za statistiku (2011), <http://www.dzs.hr>
- [26] Klempić, S.: Split as an In-migration Centre, Hrvatski geografski glasnik, 66 (2004) 1, pp. 5-28.
- [27] Parham, A.M., Fariborz, H.: Approaches to study Urban Heat Island e Abilities and limitations, Building and Environment, 45 (2010), pp. 2192-2201, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.001>
- [28] Parham, A.M.: Recent challenges in modeling of urban heat island, Sustainable Cities and Society, 19 (2015) 200-206, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.04.001>
- [29] Voogt, J.A., Oke, T.R.: Thermal remote sensing of urban climate, Remote sensing of Environment, 86 (2003), pp. 370-384, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- [30] Tomlison, J.C., Chapman, L., Thornes, J.E., Baker, C.: Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology: a review, Meteorological Applications, 18 (2011) 3, pp.
- [31] Dwivedi, A., Khire, M.V., Mohan, B.K.: Estimation of Land Surface Temperature to Study Urban Heat Island Effect in Mumbai Using Landsat ETM+ Image, International Journal of Remote Sensing and GIS, 4 (2015) 1, pp. 8-16.
- [32] Srivanit, M., Hokao, K.: Thermal Infrared Remote Sensing for Urban Climate and Environmental Studies: An Application for the City of Bangkok, Thailand, Journal of Architectural/Planning Research and Studies, 9 (2012) 1, pp. 83-100.
- [33] Rao, P. K.: Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite, Bulletin of the American Meteorological Society, (1972) 53, pp. 647- 648.
- [34] IPCC: Climate Change 2014 - Mitigation of Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, (2014).
- [35] DHMZ: Praćenje i ocjena klime u 2015. godini - Climate monitoring and Assesment for 2015, Državni hidrometeorološki zavod (Pandžić, K., Lisko, T. ed.), (2016), pp. 45
- [36] Barsi, J.A., Schott, J.R., Palluconi, F.D., Hook, S.J.: Validation of a Web-Based Atmospheric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments, Earth Observing Systems X, ed. Butler, J.J., Proceedings of SPIE Vol. 5882.
- [37] Schott, J.R., Brown, S.D., Barsi, J.A.: Calibration of Thermal Infrared (TIR) Sensors, In J. Luvall & D. Quattrochi (Eds.). Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes. United Kingdom, Taylor & Francis.
- [38] Barsi, J.A., Schott, J.R., Palluconi, F.D., Helder, D.L., Hook, S.J., Markham, B.L., Chander, G., O'Donnell, E.M.: Landsat TM and ETM+ Thermal Band Calibration," Canadian Journal of Remote Sensing, 28 (2003) 2, pp. 141-153.
- [39] USGS: Landsat 8 (L8) Data Users Habbdbook, Department of the Interior U.S. Geological Survey, EROS, Sioux Falls, South Dakota, (2015) http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php
- [40] Lin, B.: Earth Radiation Budget, Top of Atmosphere Radiation in Encyclopedia of remote sensing (ed. Njoku, E.G.), Springer, 2014, pp. 145-146.
- [41] Golden, J.S.: The Built Environment Induced Urban Heat Island Effect in Rapidly Urbanizing Arid Regions - A Sustainable Urban Engineering Complexity, Environmental Sciences, 1 (2004) 4, pp. 321-349.
- [42] Zaninović, K., Matzarakis, A.: Impact of heat waves on mortality in Croatia, International Journal of Biometeorology, (2014) 58, pp. 1135-1145, <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0706-3>